

曹令敏. 地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 701~708, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 040.

Cao L M. The application and expectation of the geophysical methods to deep metal mine exploration. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(2): 701~708, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 040.

地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望

曹令敏

(中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 地球物理勘探方法对深部隐伏矿床找寻及预测具有很强的指导性, 在近年来国内外找矿工作中(特别是隐伏矿的预测)取得了很好成效. 本文着重论述了重、磁、电、震、测井等地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用特点和成果. 事实表明, 不同物探方法在找矿过程中有不同的特点和适用条件, 要根据具体找矿对象特征, 综合运用这些方法, 并结合地质与地球化学研究成果, 才能对深部找矿具有较好的指导作用.

关键词 地球物理勘探, 隐伏矿床, 深部找矿, 地震层析成像

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 040

中图分类号 P631

文献标识码 A

The application and expectation of the geophysical methods to deep metal mine exploration

CAO Ling-min

(State Key laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract It is known to all that geophysical prospecting method which is of high-efficiency and high-precision plays very good roles in forecasting concealed ore body. In recent years, applying this method to deep exploration at home and abroad obtains great achievements. The paper introduces the application of different geophysical methods to deep metal mine exploration, such as gravity, magnetism, electricity, seismology, well logging, etc., each of which has respective characteristics and conditions for use. Therefore, these geophysical methods should be applied in combination with geology and geochemistry in order to find out an extension of concealed ore bodies.

Keywords Geoexploration, blind deposits, deep exploration, seismic tomography

0 引 言

随着国民经济建设的不断加速发展, 我国对矿产资源的需求愈加广泛和强烈, 尤其是铜、金、银、铀等金属矿产已面临紧缺. 并且, 随着地表矿和浅部矿产的大量挖掘, 浅部资源储量日益减少, 深部找矿已成为全球矿产资源勘查的主要方向. 目前, 世界上金属矿的开采深度一般在 1000 m 左右, 兰德金矿最深可达 4000 m, 芒特艾萨接近 3000 m; 而我国的开采深度一般在 500 m 左右. 因此, 研究一种有效的

勘探手段对地下深部矿体进行高精度探测, 对我国寻找隐伏矿、盲矿和难识别矿方面必将带来很大的效益. 其中, 根据刘光鼎院士“区域约束局部, 深层制约浅层”^[1]的指导思想, 应用地球物理方法“攻深探盲, 寻找大矿、富矿”^[1]已在隐伏矿床预测中取得了一定的进展与成绩.

1 深部找矿存在的难题

深部找矿并不是勘探深度的简单增加. 随着找矿目标体埋藏深度的不断变深, 地下地质环境、构造

收稿日期 2010-10-11; 修回日期 2011-01-29.

基金项目 国家自然科学基金项目(90814011, 40674046)资助.

作者简介 曹令敏, 1983 年生, 吉林延吉人, 在读博士研究生, 主要从事金属矿地震层析成像方法技术研究工作.

(E-mail: caolingmin0216@gmail. com)

复杂程度都要根据间接资料进行预测,传统的地质方法在深部找矿方面已经失去直接进行勘查的能力。此外,深部找矿问题是探索性很强的实践问题,具体矿区的深部找矿具有很强的实例性、个案性,必须紧密结合找矿实践,不断修正对成矿特征的认识,才可能获得良好的找矿效果。第三,深部找矿问题又具有高度的综合性,是多学科的高度综合,其中包括地质、矿产、勘查技术等相关学科的全部内容,必须实现多专业知识的有机结合,地质、物探、化探技术应用相结合,最后进行钻探验证^[12]。

2 深部找矿的勘查技术与方法

地质、地球物理和地球化学是地球科学的基础学科,它们研究的对象都是地球,只是从不同的角度,采用不同的方法、技术,相互渗透、相互补充^[3]。其中,地质研究是基础条件,物探、化探作为技术支撑条件,钻掘探矿工程为实现条件,它们构成基本技术路线^[2]。

过去在金属矿床找矿勘探中,多以地质为主,地球化学为辅,缺乏地球物理方法的应用,尤其缺乏地震勘探。如今,随着地表露头矿的减少和勘查选区的难度加大,应用地质、地球化学等方法能够寻找的地表矿和浅部矿越来越少,找矿的主体已开始转向隐伏矿和深部矿,单靠地质标志进行找矿几乎不可能实现。

地球化学勘查是以地球化学理论为基础,通过系统地测量天然物质的地球化学性质,发现各种类型的地球化学异常。该方法分析元素多、信息量大、测试灵敏度高、活动性高的指示元素穿透性强,并且野外施工快速、经济^[4]。然而,使用地球化学方法取样化验,在深部找矿中很难取得良好的效果。

因此,随着探测目标体埋藏深度的不断加大,地下构造越加复杂,传统的地质方法面对深部矿体失去直接找矿与勘查的能力时,“攻深探盲,寻找大矿、富矿”必须引入地球物理方法来进行找矿勘探,因为只有地球物理方法可以对地下地质结构、分层信息和控矿构造进行精细刻画,达到高精度深部探测的要求。而且通过地震和测井方法,还可以给出地下隐伏矿体的埋藏深度,实现隐伏矿床的定位预测。

所谓地球物理勘查是利用物理的方法原理来研究和解决地下地质问题。它利用相适应的仪器测量、接收工区内各种物理现象的信息,利用有效的处理方法从中提取出所需信息,并根据岩(矿)体或构造与围岩的物性(密度、磁性、电性、弹性、放射性等)差

异,结合地质资料进行综合分析,推断并解释地下地质构造和矿产分布等情况。地球物理勘探是在当今高科技成果不断应用和创新之下发展起来的,是地球科学中唯一能够直接提供地球内部信息和资料的学科,应用高精度、高分辨率、大探测深度、多元化方法手段的地球物理勘查方法技术可以将勘探深度提高至 1000~2000 m^[3],并能够确定隐伏矿床的场结构和构造控矿的空间结构^[5,6],对地下隐伏矿床进行定位预测。因此,在矿产资源勘探中地球物理方法应该受到更为广泛的重视,而不应该被忽视。

3 深部找矿中地球物理勘探的思路

地球物理方法的重要能力在于它能够了解并提供地下三维结构及相应的物性参数信息,对隐伏矿床的预测有着不可替代的作用。刘光鼎院士提出了应用地球物理方法来研究深部构造特征与地质环境,给出了隐伏矿床预测的综合地球物理方法^[7,8],从宏观与微观两个预测层次上,为深部矿和隐伏矿的预测提供了地球物理依据^[9]。

地球物理勘探在金属矿深部找矿中的思路一般包括以下几个步骤。首先在地质理论认识的指导下尽量丰富的获取岩石物性资料,建立地质模型;然后通过野外数据采集获得地球物理场数据;经过数据处理,提高资料信噪比;之后使地质与地球物理、定性与定量、正演与反演相结合,实现联合反演^[3];最后通过多次迭代、拟合,使反演结果逼近最优解。

然而,深部找矿不能只局限于方法和技术的研究,必须要有坚实的理论基础。刘光鼎院士针对综合地质地球物理工作曾总结出“一种指导,两个环节,三项结合,多次反馈”的综合解释思想^[1]。其中“一种指导”是指以岩石层板块大地构造理论为指导,“两个环节”分别指岩石物性和地质模型,岩石物性即地质与地球物理之间的纽带,地质模型即跨越地球物理场的定性解释和定量解释之间的桥梁,“三项结合”是说地质与地球物理的紧密结合、定性解释和定量解释的紧密结合及正演问题与反演问题的紧密结合,“多次反馈”就是通过信息的多次反馈逐步加深对地质、地球物理信息的认识,有效克服反演问题的多解性,使解释结果逐渐趋向合理、完善与精确。最后值得注意的是,综合利用地质、地球物理和地球化学方法技术的同时,还要充分将地球物理各方法(如重、磁、电、震)相结合,利用多种地球物理方法进行综合勘探,对比解释,以减少最终的多解性。

4 地球物理方法在深部找矿中的应用及研究现状

随着物探仪器和技术的飞速发展,特别是电子计算机技术的应用,地球物理勘探在金属矿预测方面已占据了重要地位,应用越加广泛。常用的物探方法有:重力、磁法、电法、地震、放射性等测量方法,均是根据岩石所引起的各种异常进行测量:

(1)磁法是利用矿石中所含磁性矿物(常见的是磁黄铁矿)所引起的磁异常进行测量;

(2)重力勘探的依据是矿石中含有大量黄铁矿等密度比围岩的大矿石所引起的重力异;

(3)电法则视整个矿体为一个低电阻的良导体,其能引起各种电法异常;

(4)地震勘探是探测矿体与围岩之间存在的速度或波阻抗差异。

高精度重、磁、电法可在较大范围内探测地下介质结构、构造和物质的物理属性。而人工震源地震和大地电磁方法则可以给出深达数十公里之内的精细结构^[19]。

在地面方法系统中,国内外最常用的是电法,过去多用激发极化法,现在则是以过渡场法(或叫瞬变电磁法)为代表的电磁法。近年来,电磁法探测技术有了飞跃进展,常用的方法有甚低频法、连续电导率成像(EH4)、瞬变电磁法(TEM,探测深度达400余米)^[11,12]、可控源音频大地电磁法(CSAMT,探测深度从几十米到1 km左右)^[13]和激发极化法(探测深度从几十米到百余米)。刘建明等^[15]在好力宝铜矿床区采用甚低频电磁仪扫面、EH4电磁测深和激发极化测深三种技术方法,发现了与成矿有关的地球物理异常,并经检验钻孔验证,证明这些方法在隐伏金属矿体预测中有着快速、高效和实用的优点。八家子锌、铅矿床的埋藏深度在800 m以上^[10],应用可控源音频大地电磁测深方法,经验证,其在该区深部找矿工作中获得非常好的效果。此外,在辽宁本溪发现了国内外业界震惊的超大型大台沟铁矿,就是先后采用大地电磁测深和1:1万物探高精度磁法测量,探明储量在30亿吨以上。该区探孔从地下1200 m左右开始见矿,一直到地下1860 m都开采出了完整的铁矿岩心,最深可达地下2050 m,仍然见到品位较高的铁矿,是我国深部找矿的成功实例之一。

磁法的应用也十分广泛,在寻找磁性铁矿方面效果较好。目前,利用航磁发现的铁矿床占我国磁铁矿总数的80%,如安徽霍邱、新疆磁海河天湖等^[16]。

应用低缓磁异常研究方法先后在山东、安徽及新疆等地区发现一批大型隐伏矿床^[17]。应用剩余磁异常计算方法在山东莱芜、湖北大冶铁山及金山店等地寻找钻孔旁侧或底部的盲矿,也都取得了很好的效果^[18]。

近年来,重力仪观测精度也在不断提高从mgal级发展到 μmal 级,重力勘探已成为寻找隐伏矿床的重要方法与手段。应用重力方法对金属矿床进行勘探主要是通过两个途径,一是在有利条件下通过重力测量仪检测矿体在地表反映出的重力异常直接寻找矿体;二是研究金属矿床赋存的岩体或构造,以推断矿体的位置。我国安徽庐枞地区和江苏江宁地区的隐伏黄铁矿均是利用重力勘探找到的^[19]。1974年,在澳大利亚的奥林匹克坝^[20]矿床的发现过程中,重力勘探就起到了主重作用,特别是区域重、磁资料反演、分析和解释,在矿区圈定出多个找矿靶区。随着俄罗斯的诺里尔斯克铜矿的开采,浅部矿产资源逐渐面临枯竭,因此要向深部和周围发展,而预测埋藏深度在700~2000 m之间,在深部找矿过程中也主要采用高精度重力测量,取得很好的效果。

井中物探方法对发现井旁和井底的盲矿十分有效。井中物探可以采用多种方法,如井中磁测、井中激发极化法和井中瞬变电磁法等^[21,45]。其中,井中瞬变电磁法在西方国家使用较多,并且找矿效果很好,探测深度一般可达2500~3000 m,可探测到井周半径200~300 m范围之内的良导体。哈萨克斯坦应用井中充电法在库斯穆龙成功探测到埋深700 m的含铜黄铁矿体^[22]。目前,我国在深部矿产勘查中也在推广和普及井中物探方法。

作为地球物理勘查技术中分辨率最高的方法,近年来,地震勘探也开始逐渐被用于金属矿深部找矿中^[46~49]。当矿体埋藏较浅(<500 m)时,上述的重、磁、电法的勘探效果较好,但由于方法原理中固有的缺陷,其勘探能力和精度随着勘探深度的增加而急剧下降^[23]。与之相比,地震勘探对地下深部探测具有精度高、探测深度大、分辨率高和探测结果准确可靠等优点。蔡新平^[24]较早的将浅层地震方法应用于金厂峪金矿区隐伏矿床的地质结构与构造的研究,并成功的预测和发现多处隐伏金矿体。梁光河等^[14,25]分别在黑龙江乌拉嘎金矿和云南省北衙地区隐伏金矿的预测中利用浅层地震勘探对不同类型的金矿床隐伏矿地质结构进行系统研究,并取得一定成效。目前,国外反射波地震勘探在金属矿勘探应用中也刚刚起步。在加拿大的萨德伯里,应用三维地

震勘探寻找深部镍-铜已取得了显著的成效^[26,27]。通过深部勘探,这个 1889 年发现的老矿区铜镍储量增加到 1 亿多吨,矿区内最深勘探深度已达 2430 m,开采深度也超过 2000 m,是一个典型应用地震方法进行深部找矿的成功实例^[16]。

由于每一种物探方法都有其自身的局限性,使其对一个具体的勘探目标的解释存在“多解性”,并且随着勘探目标的深度和地下构造复杂化的不断加大,使得单凭一种物探方法难以对地下信息作出合理的解释。因此,综合利用目标体的不同物性,从各个角度对同一目标体进行描述,就能使解释结果更接近于实际地质情况,以减少多解性。目前,国内外也多采用综合物探方法系统来进行深部找矿。澳大利亚利用综合物探法在新南威尔士科巴地区找到了一个大型的隐伏铅锌、银多金属矿床^[28]。赵家围子银铅锌多金属矿床^[29]和河北蔡家营铅锌银矿床^[30]的发现也是应用综合物探方法进行深部找矿的成功范例,后者分别利用了激发激化法、重力、磁法等勘探手段,发现多个矿带的隐伏矿体。东天山白石泉矿区隐伏铜镍矿^[31]的预测综合利用了地球物理多方法,尝试性地引入了高分辨率的浅层地震与大地电磁测深法,并结合常规的高精度重力、磁法和激电法,探查获得隐伏含矿岩体空间分布形态与定位预测信息,共发现 5 个隐伏低阻异常区。内蒙古吉尔敖包多金属矿勘查中综合采用了地质、地球化学、综合信息矿产预测模型及地球物理勘探方法,有力的证明了综合方法的找矿效果^[50]。

5 金属矿常规地震勘探存在的问题及地震层析成像方法的研究

与油气等能源勘探相比,金属矿勘探所涉及的地震地质条件和要解决的地质问题更加复杂。很多具有经济价值的矿体尺度与地震波波长相当,此时地震波的传播不再满足斯奈尔定律,而是遵循惠更斯-菲涅尔原理,即产生散射,而非反射信号。所以在金属矿勘探中,不同尺度的非均匀地质体共生,往往形成极其复杂、多种波相互干涉的地震波场,从而对地震方法理论、地震资料采集、处理和解释等技术方法方面提出了挑战。

此外,金属矿通常所处的地质环境相对油气资源地质环境更为复杂,不但地下地质结构复杂(除少量的层状金属矿床外,大多金属矿地层倾角较大,与隐伏岩体有关),地形也很复杂,多为高山峻岭,使地震勘探野外施工更加困难。要解决金属矿勘查中的

陡倾斜地层、复杂构造和不规则形态的隐伏岩体等地质问题,单靠反射波地震方法还远远不够,三维成像技术是不可缺少的。地震成像技术分为偏移成像和层析成像两种,其中偏移成像是反射波地震数据处理中的关键步骤。然而,由于常规的反射波地震勘探是针对层状沉积盆地上找构造圈闭发展起来的,相反,金属矿构造复杂,矿体常呈鸡窝状等复杂形态,无论从理论上还是方法技术上都很难将常规地震勘探理论直接套用在金属矿区。因此,依靠偏移成像不能很好的反映出地下的三维信息,而地震层析成像^[32,33]却能很好的解决这些问题。

地震层析成像的基本原理是利用地震波穿越地质体的走时及振幅的变化,经过计算机处理,重新建立地质体内部的结构图像,它是现代地震数字观测技术与计算机技术紧密结合的产物。早期的地震层析成像主要是利用天然地震的体波和面波来研究地球内部构造及区域地壳和上地幔、下地幔构造^[34,35],虽然精度较低,但是在大地构造研究上取得了良好的效果。近二十年来,该方法受到高度重视,不断被尝试引入探矿中来,并发展出了高密度人工地震层析成像这一新方法技术。

人工地震层析成像方法是用人工方法激发地震波,使其穿透地下岩体,通过地震波走时和地震波能量变化的观测,利用计算机处理数据,反演出地下岩体的岩性分布、断裂构造、矿体位置及形态的结构图像^[36]。1986 年首次在瑞典北部 Kiruna 铁矿的地震层析成像探测中,观测系统有较大的地震射线密度和较好的射线正交性,是地震层析成像方法在金属矿勘探中的成功应用。赵永贵等^[35,36]人利用人工地震 CT 方法在金川龙首矿进行了隐伏铜镍矿体的探测实验,并取得了显著的成效,是一次比较成功的尝试。常旭等人也利用高分辨率地震 CT 法对宽度不足 1 m 的隐伏矿脉进行了有效的定量观测与追踪^[37],证实了层析成像对缺少露头资料的隐伏矿区勘探是一种有效的地球物理方法,在金属矿隐伏矿床定位预测中具有良好的发展前景,相信将来会得到更广泛的应用。

6 地震层析成像方法的优势

6.1 与电磁波层析成像比较

层析成像受到高度重视以来,发展较早较快的是电磁波层析成像方法,如欧洲就成功的应用电磁波 CT 探测技术来寻找核废料处理基地^[38]。与电磁波层析成像相比,地震层析成像具有如下优势^[39]:

(1)由于岩石的地震波速度与岩性有着相对稳定的相关性,因此地震层析成像适合用来对地球内部进行成像,而岩石的电学性质(如电阻率和介电系数)变化范围很大,与岩石空隙中的流体关系密切,因而不利于直接用于岩性和构造的成像,相反,对找水或确定空隙流体饱和度等专门问题,电磁反演法反而比地震层析成像更为有效。

(2)就勘探深度而言,由于主要探测频段的电磁波衰减比地震波快得多,其探测目标的尺度为几米到几百米,而对应地震波的波长约为几十米,即频率为数十赫兹。这种频带的地震波在不松散的岩石中传播几公里之后,衰减一般也不超过 120 dB,很容易被接收到。反之,相应波长的电磁波频段在岩石中传播几十米后衰减就可能达到 100 dB,难以穿透几百米的岩层。

(3)地震波的传播速度为每秒几公里,振幅和到时都易于观测,且不同的震相可以在地震记录中区分开来,包含丰富的信息。而电磁波的传播速度太快,反映波速的到时参数在小尺度内难以测量。

6.2 与传统反射地震勘探方法相比

从原理上讲,地震层析成像不依赖于层状地球模型,适用于检测地下不均匀体,对金属矿勘探是一个很好的尝试。而且,通常情况下金属矿体的纵波速度比围岩低 10% 到 30%,成为开展地震层析成像的前提条件^[39]。因此,与高分辨率地震方法相比,地震层析成像方法可得到比较精确的地下速度结构,且反演结果不受复杂的地表条件影响^[40,41]。此外,反射地震方法的纵向分辨率较高,横向分辨率较低。而地震层析成像技术能够探测倾角较大的地层和复杂的地质构造及隐伏岩体等,横向分辨率有所提高^[42]。最后,地震层析成像可以从地震记录中提取出多种有效波(首波、反射 P 波、反射 S 波、折射波、转换 PS 波等),大大丰富了有效波信息,降低解释的多解性。

7 金属矿深部找矿中地球物理方法技术及仪器的发展趋势

由于金属矿区多位于山区,地形起伏较大,这就使得地球物理仪器趋向多用化、系列化、轻便化和智能化的方向发展^[43]。在地震勘探中,震源是产生地震信号的源头,是地震勘查技术的重要组成部分。震源所产生的信号质量将直接影响到地震勘查的效果。可控震源是一种地震勘探信号激发设备,在地震勘探中具有施工成本低、安全环保、施工组织灵活等

优点。因此,可控震源作业将成为高密度地震勘探的首选。为了配合金属矿区地形复杂、山地起伏和车辆难到达等特点,体积小、重量轻、便携式的电磁驱动的高频可控震源在金属矿勘探中是一项非常有实用前景的发展目标。

在数据采集方面,主要发展的是高灵敏度、大容量、大功率、多功能、多取样的采样(包括记录与储存)自动化技术。在野外施工时,大线的搬运与布设就要消耗掉大量的人力和财力,因此,大线的取缔将会给金属矿区野外施工工作带来极大的方便,大大提高工作效率。可以尝试借鉴天然地震采集站的机制,研制复杂山地无缆三分量检波器,将采集到的信号保存在检波器内的存储设备中,取消大线传输信号到中心站的过程。

数据处理方面,主要是应用计算机技术、信息数字化、成像(包括三维)和模拟等技术,使数据处理、资料解释以及视图方式实现图形可视化及自动化。山区重力资料曲化平、小波分析及高阶统计量等现代信号处理方法,重磁、重震、电震的联合反演与交互反演、三维可视化反演、BP 人工神经网络方法等在综合地球物理解释中也将得到更广泛的应用^[44]。

开展固体矿产中的非常规方法的应用研究(高频地震、地震层析等)。层析成像技术的发展给金属矿预测精度的提高带来了新的希望。目前在隐伏矿体定位预测中其还处于试验研究阶段,相信在不久的将来,随着其它配套设施的完善,必将给隐伏矿体定位预测注入新的活力。

然而,地球物理方法本身存在着一个严重的基本问题:反演问题的解是不确定的。为了取得更好的效果,需要利用其他方法给出的条件,如利用测井资料进行约束反演。这就表明,地球物理的解释工作必须走地质与各种地球物理资料做综合研究的道路^[7]。因此,利用地质、地球化学、地球物理综合方法系统,将地球物理新技术与矿田构造、矿床地质研究所获得的矿化地质模型相结合,必定会使隐伏矿床预测取得更好的成绩。

总之,在金属矿勘探中,地球物理技术正向着轻便化、快速化、量化、系统化、准确化、智能化的方向发展,应用综合地质、地球化学、地球物理进行宏观研究和微观分析,就有可能分层次地实现对隐伏大型矿床的预测,指导找矿勘探的实践。

参 考 文 献 (References):

- [1] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理综合研究(系列图说明

- 书)[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- Liu G D. Geology and geophysics integrated research on China sea area and neighbour [M]. Beijing: Science publishing Company, 1992.
- [2] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 2007, 10: 855~869.
- Ye T Z; Xue J L. Geological study in search of metallic ore deposits at depth [J]. *Geology in China*, 2007, 10: 855~869.
- [3] 刘光鼎. 回顾与展望——21 世纪的固体地球物理[J]. 地球物理学进展, 2002, 6(17): 191~197.
- Liu G D. Review and prospect—21st century solid geophysics [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 6(17): 191~197.
- [4] 韩颐. 有色金属矿产资源勘察技术方法综述[J]. 矿产与地质, 2006, 20(6): 590~593.
- Han Y. Review on geo-exploration technologies for nonferrous metal resources [J]. *Mineral Resources and Geology*. 2006, 20(6): 590~593.
- [5] 熊光楚. 寻找隐伏金属矿产的方法系统[J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5(5): 289~302.
- Xiong G C. Methodologic systems of searching for concealed ore deposits [J]. *Geological exploration for non-ferrous metals*, 1996, 5(5): 289~302.
- [6] 梁光河, 蔡新平, 张保林, 等. 浅层地震勘探方法在金矿深部预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2001, (6): 29~33.
- Liang G H, Cai X P, Zhang B L, *et al.* The application of seismic exploration method in deep prediction of gold deposits [J]. *Geology and Prospecting*, 2001, (6): 29~33.
- [7] 刘光鼎, 郝天姚. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6): 850~854.
- Liu G D, Hao T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1995, 38(6): 850~854.
- [8] 刘光鼎, 郝天姚, 刘伊克. 中国大地构造宏观格架及其与矿产资源的关系[J]. 科学通报, 1996, 42(2): 115~118.
- Liu G D, Hao T Y, Liu Y K. Macro-geotecture and the relation between it and mineral resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 42(2): 115~118.
- [9] 李景朝, 刘少华, 严光生. 大型超大型金属矿床综合信息成矿预测方法研究[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(4): 736~744.
- Li C J, Liu S H, Yan G S. The research method of large and super-large ore deposits for synthetical information metallogenic prediction [J]. *Progress in geophysics*, 2002, 17(4): 736~744.
- [10] 严加永, 滕吉文, 等. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 871~890.
- Yan J Y, Teng J W, *et al.* Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 317~334.
- [11] 何继善. 电法勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 308~316.
- He J S. Development and prospect of electrical prospecting method [J]. *Chinese journal of Geophysics*, 1997, 40: 308~316.
- [12] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195~1200.
- Xue G Q, Li X, Di Q Y. The theory and application of transient electromagnetic method [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1195~1200.
- [13] 王元君, 杨轮凯, 刘宏. 综合物探方法在秦岭探测隐伏铅锌矿中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 320~322.
- Wang Y J, Yang L K, Liu H. The application of the integrated geophysical and geochemical method to the search for concealed lead-zinc deposits in Qinling area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(4): 320~322.
- [14] 曹令敏. 隐伏矿床定位预测理论和技术的研究现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1037~1045.
- Cao L M. The status and trends of researching on the theory and technique of the location prediction for concealed orebody [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(3): 1037~1045.
- [15] 孙兴国, 刘建明, 等. 综合物探方法在好力宝铜矿床的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1910~1915.
- Sun X G; Liu J M, *et al.* The application of integrated geophysical prospecting method to the evaluation of Haolibao copper deposits [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(6): 1910~1915.
- [16] 姜德波, 等. 磁法在我国矿产预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 249~256.
- Lou D B, *et al.* The application of magnetic method in national mineral prediction [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(1): 249~256.
- [17] 管志宁. 我国磁法勘探的研究与进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 299~307.
- Guan Z N. Researches and progresses of magnetic prospecting in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40: 299~307.
- [18] 熊光楚. 金属矿区磁法勘探的进展与展望[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊): 435~443.
- Xiong G C. Development of magnetic exploration searching for metallic ore deposits in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(1): 437~443.
- [19] 王懋基. 中国重力勘探的新进展[J]. 地球物理学报, 1994, 37: 353~360.
- Wang M J. New development of gravity prospecting in china [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(1): 353~360.
- [20] Roberts D E, Hudson G R T. The olympic dam copper-uranium-gold deposit [J]. *Roxby Downs, South Australia, Econ Geo*, 1983, 78(5): 799~822.
- [21] 曹新志, 张旺生, 孙华山. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技通报, 2009, 28(2): 104~109.
- Cao X Z, Zhang W S, Sun H S. Progress in the study of deep exploration in China [J]. *Geological Science and Technology*

- Information, 2009, 28(2): 104~109.
- [22] 戴自希,王家枢. 矿产勘查百年[M]. 北京:地震出版社, 2004.
Dai Z X, Wang J S. Mineral exploration century [M]. Earthquake Press, 2004.
- [23] 勾丽敏,刘学伟,等. 金属矿地震勘探技术方法研究综述——金属矿地震勘探技术及其现状[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(1): 16~24.
Gou L M, Liu X W, *et al.* Review of seismic survey in mining exploration: Part 1 Theory and reflection seismic methods [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(1): 16~24.
- [24] 蔡新平,刘秉光,季钟霖. 金厂峪金矿的控矿构造及其地球物理验证[J]. 黄金科学技术, 1994, 2(5): 1~7.
Cai X P, Liu B G, Ji Z L. Ore-controlling structure and geophysics verification of Jinchangyu gold deposit [J]. Gold Science & Technology, 1994, 2(5): 1~7.
- [25] 梁光河,蔡新平,王杰,等. 浅层地震勘探在云南北衙地区隐伏金矿预测中的应用[J]. 黄金科学技术, 2000, 8(6): 1~9.
Liang G H, Cai X P, Wang J, *et al.* The application of seismic exploration method in prediction of concealed Beiya gold deposit in Yunnan Province [J]. Gold Science & Technology, 2000, 8(6): 1~9.
- [26] Milkereit B, Berrer E K, Watts A, Roberts B. Development of 3D seismic exploration technology for Ni-Cu deposits, Sudbury basin. in Grubbins [J]. Proceedings of Exploration, 1997: 439~448.
- [27] Bernd. Milkereit, *et al.* Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel~copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada [J]. Geophysics, 2000, 11: 1890~1899.
- [28] 彭省临,邵拥军. 隐伏矿体定位预测研究现状及发展趋势[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3): 329~334.
Peng S L, Shao Y J. Present research situation and trends of prognosis for concealed orebody [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(3): 329~334.
- [29] 陈伟军,刘洪涛. 综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 293~302.
Chen W J, Liu H T. Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China [J]. Progress In Geophysics, 2009, 24(1): 293~302.
- [30] 曹洛华,周安昌,等. 在有色金属矿勘查中综合物探的应用[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 425~434.
Cao L H, Zhou A C, *et al.* The application of integrated geophysical survey to the prospecting for nonferrous metallic deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 425~434.
- [31] 吴华,徐兴旺,莫新华,等. 东天山白石泉矿区地球物理多方法联合探查与隐伏铜镍矿定[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 672~681.
Wu H, Xu X W, Mo X H, *et al.* Exploration by combined geophysical methods and location prediction of buried Cu-Ni deposits in the Baishiquan area, eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 672~681.
- [32] Daily W D. Underground oil-shale retort monitoring using geotomography [J]. Geophysics, 1984, 49: 1701~1711.
- [33] Somerstein. Radio-frequency geotomography for remotely probing the interior of operating mini and commercial-sized oil-shale retorts [J]. Geophysics, 1984, 49: 1288~300.
- [34] 高星. 地震层析成像研究的回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 41~45.
Gao X. Advance and review in seismic tomography [J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(4): 41~45.
- [35] 赵永贵,王超凡,等. 地震 CT 在寻找隐伏铜镍矿中的应用[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 272~278.
Zhao Y G, Wang C F, *et al.* Seismic tomography and its application to prospecting of concealed Nickel-Copper ore [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(2): 272~278.
- [36] 赵永贵,王超凡,等. 地震 CT 及其地质解释[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 96~102.
Zhao Y G, Wang C F, *et al.* Mining application of seismic tomography and its geological interpretation [J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 32(1): 96~102.
- [37] 常旭,王辉. 地震 CT 法隐伏矿脉空间定位研究[J]. 地球物理学报, 1998, 41(3): 408~415.
Chang X, Wang H. Locating subsurface auriferous quartz vein by means of seismic tomography [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(3): 408~415.
- [38] Sandberg E V, Olsson O L, Falk L R. Combined interpretation of fracture zones in Crystalline rock using single-hole, crosshole tomography and directional borehole-radar data [J]. The Log Analyst, 1991, 32: 108~119.
- [39] 杨文采,李幼铭,等. 应用地震层析成像[M]. 北京:地质出版社, 1993.
Yang W C, Li Y M, *et al.* Applying Seismic Tomography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [40] 徐明才,高景华,等. 地面地震层析技术在金属矿勘查中的试验研究[J]. 物探与化探, 2005, 29(4): 299~303.
Xu M C, Gao J H, *et al.* The tentative application of surface seismic tomography to the exploration of metallic deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(4): 299~303.
- [41] 徐明才,高景华,等. 地震层析技术及其应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2004, 26(4): 289~204.
Xu M C, Gao J H, *et al.* Seismic tomography technology and its application [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 26(4): 289~204.
- [42] 荣立新. 应用于金属矿勘查中的地面地震层析成像技术[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊): 125~128.
Rong L X. The ground seismic tomography for mineral explorations [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29: 125~128.

- [43] 韩金良,张宝林. 隐伏金矿床定位预测研究现状与展望[J]. 黄金科学技术, 2000,8(5):1~12.
Han J L, Zhang B L. The status and expectation of research on positioning prognosis of blind gold deposits [J]. Gold Science & Technology, 2000,8(5):1~12.
- [44] 刘天佑,朱铨. 综合地球物理数据处理新方法在西部油气勘探中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2006,29(2):104~108.
Liu T Y, Zhu X. New processing methods for integrated geophysical data and their applications in the petroleum exploration in Western China [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006,29(2):104~108.
- [45] 周平,陈胜礼,朱丽丽. 几种金属矿地下物探方法评述[J]. 地质通报,2009, 28(2/3):224~231.
Zhou P, Chen S L, Zhou L L. Review of a number of subsurface geophysical prospecting methods for metallic deposits [J]. Geological Bulletin of China, 2009,28(2/3): 224~231.
- [46] 李战业,尹军杰,王赞. 地震散射波模拟成像在金属矿勘探中的应用. 地质与勘探,2009,45(2):80~84.
Li Z Y, Yin J J, Wang B. The application of the numerical simulation and imaging of seismic scattered wave in exploration of metal mineral deposits [J]. Geology and Exploration, 2009,45(2):80~84.
- [47] 吕庆田,廉玉广,赵金花. 反射地震技术在成矿地质背景与深部矿产勘查中的应用:现状与前景[J]. 地质学报,2010,84(6):771~787.
Lü Q T, Lian Y G, Zhao J H. Application of reflection seismic technology in metallogenic geological background and deep mineral exploration: status and prospects [J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):771~787.
- [48] 周平,施俊法. 金属矿地震勘查方法评述[J]. 地球科学进展, 2008,23(2):120~128.
Zhou P, Shi J F. Review on seismic methods for mineral exploration [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(2): 120~128.
- [49] 袁桂琴,李飞,郑红闪,等. 深部金属矿勘查中常用物探方法与应用效果[J]. 物探化探计算技术,2010,32(5):495~499.
Yuan G Q, Li F, Zheng H S, *et al.* Geophysical technologies and their application effects for exploration of deep metallic mineral [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010,32(5):495~499.
- [50] 孔繁辉,王天意,宋晓东,等. 综合方法找矿在内蒙古吉尔敖包多金属矿勘查中的应用[J]. 地质调查与研究, 2010,33(2):108~114.
Kong F H, Wang T Y, Song X D, *et al.* A synthesis method and its application to prospecting in Jierobo polymetallic deposit exploration [J]. Geological Survey and Research, 2010,33(2):108~114.